

【書類名】明細書

【発明の名称】III族窒化物半導体発光素子

【技術分野】

【0001】

本発明は、結晶基板上に形成された、III族窒化物半導体からなるn型クラッド層とp型クラッド層との間に、III族窒化物半導体からなる井戸層と障壁層とを交互に数周期に亘り積層させてなる多重量子井戸構造の発光層を備えたpn接合型III族窒化物半導体発光素子に関するものである。

【背景技術】

【0002】

従来から、III族窒化物半導体は、短波長の可視光を放射する発光ダイオード(LED)等のpn接合型ヘテロ(hetero)接合構造のIII族窒化物半導体発光素子を構成するための機能材料として利用されている(特許文献1参照)。例えば近紫外帯、青色帯、或いは緑色帯の発光を呈するLEDを構成するのに際し、n形またはp形の窒化アルミニウム・ガリウム(組成式 $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{N}$: $0 \leq x, y \leq 1$, $x+y=1$)は、クラッド(clad)層を構成するのに利用されている(特許文献2参照)。また、窒化ガリウム・インジウム(組成式 $\text{Ga}_y\text{In}_z\text{N}$: $0 \leq y, z \leq 1$, $y+z=1$)は、活性層(発光層)を構成するのに利用されている(特許文献3参照)。

【0003】

従来において、発光層を、数量的に単一の $\text{Ga}_y\text{In}_z\text{N}$ ($0 \leq y, z \leq 1$, $y+z=1$)層から構成する技術例が開示されている(特許文献3参照)。また、発光層を量子井戸構造と称する超格子構造から構成する例も公知である(特許文献4参照)。量子井戸構造とは、障壁(barrier)層と井戸(well)層とを交互に積層させた、周期的積層構造を指している(特許文献5参照)。例えば、 $\text{Ga}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{N}$ 層を井戸層とし、窒化ガリウム(GaN)を障壁層として多重量子井戸構造の発光層を構成する実施例が開示されている(特許文献4の[実施例1]参照)。

【特許文献1】特開2000-332364号公報

【特許文献2】特開2003-229645号公報

【特許文献3】特公昭55-3834号公報

【特許文献4】特開2001-102629号公報

【特許文献5】特開2000-133883号公報

【0004】

しかし、上記の従来技術例では、発光層の一端側、他端側が必ずしも障壁層に限定されておらず、何れか一方が井戸層の場合は、その井戸層を経由してクラッド層へのキャリア(電子)の拡散が発生しやすく、それだけ発光出力が低下してしまうという問題点を有していた。

【0005】

また、特にp型クラッド層に接する発光層の多端側に障壁層が形成されていても、その障壁層の層厚が十分でなく、n型クラッド層側から注入されたキャリアのp型クラッド層側への流入を抑制することができず、その影響で発光出力が低下してしまうという問題点も有していた。

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

本発明は、上記に鑑みてなされたもので、発光層を多重量子井戸構造とした場合でも、クラッド層へのキャリアの拡散を抑制し、発光出力を大幅に向上させることができるpn接合型III族窒化物半導体発光素子を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0007】

1) 上記目的を達成するために、第1の発明は、結晶基板上に形成された、III族窒化

物半導体からなるn型クラッド層とp型クラッド層との間に、III族窒化物半導体からなる井戸層と障壁層とを交互に数周期に亘り積層させてなる多重量子井戸構造の発光層を備えたpn接合型III族窒化物半導体発光素子において、上記発光層は、n型クラッド層に最も近接して対峙する一端層、及びp型クラッド層に最も近接して対峙する他端層とが共に障壁層であり、その他端層は他の障壁層よりも層厚が大である、ことを特徴としている。

【0008】

2) 第2の発明は、上記した1)項に記載の発明の構成に加えて、上記障壁層の各層厚を、一端層から他端層に向けて漸次大とした、ことを特徴としている。

【0009】

3) 第3の発明は、上記した1)項または2)項に記載の発明の構成に加えて、上記他端層は、不純物濃度が井戸層と接合する側で低く、層の中央部で最も高く、中央部よりp型クラッド層に向けて漸次減少する、ことを特徴としている。

【0010】

4) 第4の発明は、上記した1)項から3)項の何れか1項に記載の発明の構成に加えて、上記他端層には、不純物が故意に添加されていないアンドープの井戸層が接合されている、ことを特徴としている。

【発明の効果】

【0011】

本発明では、多重量子井戸構造の発光層において、その両端をなす層を何れも障壁層としたので、クラッド層へのキャリアの拡散を抑制することができ、井戸層内にキャリアを閉じ込める作用を有するため、発光出力を向上させることができる。

【0012】

また、多重量子井戸構造の発光層の両端をなす障壁層のうち、p型クラッド層に接する他端層を、他の障壁層より層厚を大としたので、n型クラッド層側から注入されるキャリア(電子)のp型クラッド層側への流入を抑制することができ、発光出力を高くすることができる。

【0013】

さらに、本発明によれば、発光効率を1.5倍程度向上させることができ、したがって、LEDランプの発光出力及び電光変換効率ともに1.5倍程度向上させることができ、省エネルギーに寄与することができる。

【0014】

また、本発明では、障壁層の各層厚を、一端層から他端層に向けて漸次大としたので、井戸層へのキャリアの閉じ込めを更に強めることができる。なお、この場合、障壁層の各層厚は、各井戸層からの発光波長が変化しない程度とするのが好ましい。

【0015】

また、他端層について、不純物濃度が井戸層と接合する側で低く、層の中央部で最も高く、中央部よりp型クラッド層に向けて漸次減少するようにしたので、他端層に接する井戸層に与える環境と、多重量子井戸層への正孔の注入効率との両立を図ることができる。

【0016】

さらに、他端層には、不純物が故意に添加されていないアンドープの井戸層が接合されているようにすることで、井戸層の結晶性を向上させることができ、発光効率を高めることができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0017】

以下にこの発明の実施の形態を詳細に説明する。

【0018】

本願発明では、結晶基板上、特に、単結晶基板上に形成されたn型またはp型の導電型のIII族窒化物半導体層を利用して、pn接合型III族窒化物半導体発光素子を構成する。

【0019】

すなわち、本発明のpn接合型III族窒化物半導体発光素子は、結晶基板上に形成された、III族窒化物半導体からなるn型クラッド層とp型クラッド層との間に、III族窒化物半導体からなる井戸層と障壁層とを交互に数周期に亘り積層させてなる多重量子井戸構造の発光層を備え、その発光層は、n型クラッド層に最も近接して対峙する一端層、及びp型クラッド層に最も近接して対峙する他端層とが共に障壁層であり、その他端層は他の障壁層よりも層厚が大となっている。

【0020】

なお、結晶基板により近い方のクラッド層をn型としてもよいし、逆にp型としてもよい。

【0021】

III族窒化物半導体層を形成する際に、基板とする単結晶材料として、融点が比較的高く、耐熱性のあるサファイア($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 単結晶)や酸化亜鉛(ZnO)、酸化ガリウム・リチウム(組成式 LiGaO_2)等の酸化物単結晶材料、また珪素(Si)単結晶(シリコン)や立方晶、六方晶結晶型の炭化珪素(SiC)等のIV族半導体単結晶、さらにはリン化ガリウム(GaP)等のIII-V族化合物半導体単結晶材料を利用できる。発光層からの発光を透過できる、光学的に透明な単結晶材料は基板として有効に利用できる。

【0022】

結晶基板上に設けるn型及びp型のIII族窒化物半導体層(クラッド層)は、組成式 $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_z\text{N}_{1-x-y-z}\text{M}_a$ ($0 \leq x \leq 1$, $0 \leq y \leq 1$, $0 \leq z \leq 1$ で且つ、 $x+y+z=1$ 。記号Mは窒素とは別の第V族元素を表し、 $0 \leq a < 1$ である。)から構成する。結晶基板と、その上に形成するIII族窒化物半導体層(クラッド層)とで格子ミスマッチがある場合、そのミスマッチを緩和して、結晶性に優れる上層をもたらす低温緩衝層或いは高温緩衝層を介在させて積層するのが得策である。緩衝層は、例えば、窒化アルミニウム・ガリウム(組成式 $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{N}$: $0 \leq x \leq 1$, $0 \leq y \leq 1$ で且つ、 $x+y=1$)から構成できる。

【0023】

n型及びp型のクラッド層を、同一の組成比のIII族窒化物半導体材料から構成する必要は必ずしもない。例えば、n型のクラッド層を窒化ガリウム(GaN)から構成し、p型のクラッド層を窒化アルミニウム・ガリウム($\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{N}$)から構成できる。n型及びp型のクラッド層は、発光層をなす量子井戸構造を構成する障壁層よりも禁止帯幅を大とするIII族窒化物半導体から構成するのが好ましい。

【0024】

n型のクラッド層とp型のクラッド層との中間に配置する発光層は、III族窒化物半導体からなる井戸層と障壁層とを交互に数周期に亘り積層させてなる多重量子井戸構造とし、その両端層(一端層及び他端層)は共に障壁層から構成する。n型及びp型クラッド層へのキャリアの拡散をより良く防止する構成とするためである。このように本発明の発光層を構成する各層のうち、n型クラッド層に最も近接して対峙する一端層、及びp型クラッド層に最も近接して対峙する他端層は、何れも障壁層として形成する。

【0025】

井戸層は、障壁層よりも禁止帯幅を小とするIII族窒化物半導体から構成する。例えば、窒化ガリウム・インジウム($\text{Ga}_y\text{In}_z\text{N}$: $0 \leq y \leq 1$, $0 \leq z \leq 1$ で且つ、 $y+z=1$)から構成する。 $\text{Ga}_y\text{In}_z\text{N}$ のインジウム組成比(ガリウム組成比)は、所望の波長の発光が得られる様に適宜、選択する。近紫外帯、青色帯、或いは緑色帯の短波長の発光を期す発光素子の発光層は、インジウム組成比を、大凡、0.40(=40%)以下、望ましくは0.25とする $\text{Ga}_y\text{In}_z\text{N}$ ($0.25 \leq z \leq 0.40$ で且つ、 $y+z=1$)から構成できる。

【0026】

多重量子井戸構造の発光層を構成する井戸層は、また、例えば、窒化・リン化ガリウム($\text{GaN}_{1-a}\text{P}_a$: $0 \leq a < 1$)等の窒素と窒素以外の第V族元素を含むIII族窒化物半導体から構成できる。 $\text{GaN}_{1-a}\text{P}_a$ では、リン(P)組成比(=a)に依存して(換言すれ

ば、窒素(N)組成比($=1-a$)に依存して)、禁止帯幅は急激に変化する。このバンドボーイング(band bowing)性を利用して、 $\text{GaN}_{1-a}\text{P}_a$ からは、紫外帯から赤色帯に亘る発光を放射できる井戸層を形成できる。

【0027】

順方向電圧(Vf)或いは閾値電圧(Vth)が低く、高い発光強度の発光素子を得るには、多重量子井戸構造をなす井戸層の数を3以上で6以下とするのが好ましい。また、量子井戸構造の発光層からの発光の波長を安定となすため、量子井戸構造の他端層をなす障壁層に接合させる井戸層は、アンドープのIII族窒化物半導体層から構成する。一端層に接合する井戸層等、他の井戸層は不純物をドーピングしたIII族窒化物半導体層から構成しても構わない。他端層に接合する以外の井戸層は、発光の波長に於いて影響を与えない。むしろ、他端層に接合する以外の井戸層を、不純物をドーピングしたIII族窒化物半導体層から構成することに依り、Vf或いはVthを低下させるのに効果を上げられる。

【0028】

量子井戸構造をなす障壁層は、また、井戸層を構成するIII族窒化物半導体の禁止帯幅に比較して、室温での電子の熱運動エネルギー($=0.026\text{ eV}$)の約10倍以上、高い禁止帯幅のIII族窒化物半導体層から構成する。好ましくは、 $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{N}$ ($0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, x+y=1$)や $\text{GaN}_{1-a}\text{P}_a$ 等の複数のV族元素を含むIII族窒化物半導体から構成する。

【0029】

本発明では特に、他端層の障壁層を、他の障壁層よりも層厚を大とするIII族窒化物半導体層から構成する。n型クラッド層側から一端層の障壁層を経由して発光層に流入する電子を、他端層に接合する井戸層内に効率的に閉じ込めるためである。量子井戸構造をなす他端層以外の障壁層の層厚は、15nm以上で50nm以下であるのが適する。他端層の障壁層の層厚は、他の障壁層の層厚の1.2倍以上で2.5倍以下とする。

【0030】

量子井戸構造を、一端層から他端層へ向けて、漸次、層厚を大とした障壁層を用いて構成しても、n型クラッド層から注入される電子のp型クラッド層側への過剰な流入(電子のオーバーフロー)を抑制するのに効果的である。例えば、一端層の障壁層の層厚を基準として1.0とすれば、その次に他端層側に近接して配置される障壁層の層厚を1.5とし、またその次に他端層側に近接して配置される障壁層の層厚を2.0とし、他端層の障壁層の層厚を2.5として量子井戸構造を構成する。或いはまた、一端層とその近隣の障壁層の層厚を同一とし、量子井戸構造の中央部をなす数層の障壁層を更に厚くし、他端層の近隣の障壁層をまた更に厚くし、他端層を最も厚くした、一端層から他端層に向けて層厚を段階的に増加させた障壁層から多重量子井戸構造を構成する。

【0031】

他端層をなす障壁層を、不純物濃度が井戸層と接合する側で低く、層の中央部で最も高く、中央部よりp型クラッド層に向けて漸次減少させたIII族窒化物半導体層から構成すると、発光層からの発光波長を安定とするのに特に効果が奏される。即ち、層の中央部よりp型クラッド層側に向けてドーパントの濃度が減少しているIII族窒化物半導体層から他端層を構成する。量子井戸構造を構成する他の障壁層は、アンドープ層或いは不純物ドーピング層の何れからも構成できる。他端層共々、他の障壁層を、不純物をドーピングしたIII族窒化物半導体層から構成すれば、Vf或いはVthを低下させるのに効果を上げられる。障壁層の場合、不純物ドーピング層の内部の不純物の濃度の分布様式には指定はない。他端層の障壁層と同様であっても良く、また、層厚方向に一様に分布されていても構わない。

【0032】

本発明に係る量子井戸構造を構成するための障壁層及び井戸層は、各種の気相成長手段、例えば有機金属化学的気相堆積法(MOCVD法、MOVPE法またはOMVPE法)、分子線エピタキシャル法(MBE法)、ハロゲン気相成長法、ハイドライド(水素化物)気相成長法等に依り形成できる。特に、MOCVD法は、リン(P)や砒素(As)等

の揮発性の高い元素を含むIII族窒化物化合物半導体も成長できるため有用である。III族窒化物半導体発光素子を構成するための各構成層を、異なる気相成長手段で形成することも許容される。例えば、発光層をなす障壁層或いは井戸層を常圧（略大気圧）または減圧MOCVD法で形成し、n型またはp型クラッド層を例えば、MBE法で形成する手法もあるが、各構成層を、同一の気相成長手段で形成するのが簡便である。

【0033】

不純物をドーピングした障壁層、例えば、n型の障壁層を得るのに適する不純物として、珪素（Si）、ゲルマニウム（Ge）、錫（Sn）等のIV族元素、及びセレン（Se）やテルル（Te）等の第VI族元素を例示できる。p型の障壁層を得るのに適する不純物として、マグネシウム（Mg）、カルシウム（Ca）等のII族元素がある。障壁層の内部にドーピングされた不純物の濃度は、例えば、2次イオン質量分析法（SIMS法）、オージェ（Auger）電子分析法等の元素分析手段を利用して定量できる。

【0034】

これらの不純物を、他端層の障壁層の成長を開始する際には、成長反応系へ供給せず、即ち、アンドープの状態で成膜を続行する。障壁層の層厚が所望の層厚の略半分に達したところで、急激に不純物を多量に添加して、不純物を高濃度に含む領域を、障壁層の中央部に形成する。中央部に所望の厚さで高濃度に不純物を含有する領域を形成した後は、今度は、添加する不純物量を経時的に減少しつつ、所望の全厚に達する迄、障壁層の成長を継続する。この様に成長反応系への不純物を添加する量を経時的に変化させれば、他端層の不純物濃度は、井戸層と接合する側で低く、層の中央部で最も高く、中央部よりp型クラッド層に向けて漸次減少する。

【0035】

他端層をなす障壁層の内部に設ける高い不純物濃度の領域の厚さは、2.5 nm以上で40 nm以下とするのが好ましい。この高い不純物濃度に於ける具体的に好ましい不純物濃度の範囲は、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上で $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以下の範囲である。この領域の厚さが薄ければ薄い程、この領域での不純物濃度を高くすると順方向電圧の増加を防止するのに優位となる。例えば、高い不純物濃度の領域の厚さが2.5 nm～5.0 nmである場合、不純物濃度を $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ から $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の範囲とすると低い順方向電圧を得るのに好結果が得られる。

【0036】

他端層をなす障壁層にあって、井戸層と接合する側の内部領域は、何もアンドープ領域とする必要はない。他端層の中央部の領域に比較して、添加する不純物の濃度が低ければ良い。この低い不純物濃度に於ける不純物の濃度は、 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 未満以上で $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 未満とするのが適する。 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以上で $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ とするのが更に適する。

【0037】

他端層をなす障壁層には、不純物が故意に添加されていないアンドープの井戸層を接合させて設けるのが好適である。不純物濃度の少ない高純度の井戸層を接合させれば、不純物により形成される準位の影響に因る副次的な発光も避けられ、単色性に優れた発光が得られる。また、不純物の存在に因り歪が発生する度合いも少なく、従って、所望の波長を有する発光が安定に得られる利点がある。

【0038】

発光層の一端層に接するn型クラッド層は、井戸層の禁止帯幅より大きい禁止帯幅のn型の $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$ ($0 \leq x, y \leq 1, x+y=1$) から構成できる。また、n型の $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 \leq x, y \leq 1, x+y=1$) から構成できる。 $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$ からn型クラッド層を構成すれば、その上には、結晶歪が緩和された発光層を形成することができ、発光効率に優れたIII族窒化物半導体発光素子が得られる。また、発光層の一端層に接するn型クラッド層として、In組成比（ $=Z_1, Z_2$ ）を各々、異にする窒化ガリウム・インジウム層からなる $\text{Ga}_{Y_1}\text{In}_{Z_1}\text{N} / \text{Ga}_{Y_2}\text{In}_{Z_2}\text{N}$ ($0 \leq Y_1, Y_2, Z_1, Z_2 \leq 1, Y_1 \neq Y_2, Z_1 \neq Z_2, Y_1+Z_1=1, Y_2+Z_2=1$) 超格子構造を用いることができる。こ

の様な超格子構造を下地層として利用することで、結晶歪が緩和された発光層を形成でき、発光効率が一層向上したIII族窒化物半導体発光素子を得るのに便利となる。

【0039】

本発明に係るIII族窒化物半導体発光素子、例えば、LEDは、本発明の構成からなる障壁層を含む多重量子井戸構造の発光層を備えた積層構造体にオーミック電極を設けて構成する。結晶基板として導電性に優れる、例えば、珪素(Si)、或いは立方晶3C結晶型、六方晶4Hまたは6H結晶型の炭化珪素(SiC)である場合、基板をなす結晶材料の導電型に対応させて、n型またはp型の一方のオーミック電極を設けられる。他方の導電型に適するオーミック電極は、本発明に係る構成からなる多重量子井戸構造上の、基板の結晶とは反対の導電型を有するクラッド層上に、またはクラッド層上のコンタクト層上に設ける。

【0040】

基板が高抵抗または電気絶縁性の、例えばサファイアである場合、n型またはp型の何れかのオーミック電極を、基板に接触させて設けられない。このため、積層構造体を構成するn型またはp型の構成層上に各々設ける。例えば、n型(p型)のオーミック電極を、n型(p型)のクラッド層、或いは同クラッド層上のコンタクト層に設ける。また、n型(p型)のクラッド層とn型(p型)の導電型の発光層との中間に配置した、発光層との禁止帯幅の差異を緩やかに縮小するための、或いは発光層の結晶性を向上させるため等の、例えばGaYIn_zN ($0 \leq Y, Z \leq 1, Y+Z=1$)層を含むn型(p型)中間層上に設けて構成する。

【0041】

絶縁性または高抵抗の結晶基板には、電気的に導通するオーミック電極を設けるのは不都合であるが、代替として、光学的に透明である基板では、積層構造体が形成されているのとは対向する基板表面に、例えば、単層の金属膜或いは多層に重層させた多重金属膜からなる、基板を透過して来る発光を外部取り出し方向へ反射する機能を発揮する反射膜を設けられる。発光の反射機能を備えた透明な高抵抗基板を利用すれば、発光強度の高いII族窒化物半導体LEDを得られるのに優位である。青色帯や緑色帯の波長の発光を反射させる反射層は、例えば、希有金属類やニッケル(元素記号: Ni)及びその合金類から構成できる。

【0042】

接触抵抗の低いn型またはp型オーミック電極を形成するために設けるn型またはp型コンタクト層は、n型またはp型の低抵抗の、例えばIII-V族化合物半導体材料から構成する。発光層からの発光を外部へ透過させる方向に設けるコンタクト層は、発光波長に対応する禁止帯幅を超える、発光を透過できる高い禁止帯幅の材料から構成する。例えば、本発明の多重量子井戸構造をなす井戸層の構成材料よりも禁止帯幅を大とするIII族窒化物半導体材料から構成する。例えば、燐化硼素(化学式: BP)またはそれを素材とした高禁止帯幅の燐化硼素・ガリウム(組成式B_qGa_rP: $0 < Q, R < 1, Q+R=1$)や燐化硼素・インジウム(組成式B_qIn_rP: $0 < Q, R < 1, Q+R=1$)等の混晶から構成できる。単量体のBPでは、アンドープ状態でも成長温度等の調整に依り、容易にn型及びp型の低抵抗層が得られるため、コンタクト層を構成するのに適する材料である。

【0043】

本発明に係る多重量子井戸構造の発光層から出射される発光を、LEDの外部へ取り出す方向に設けるn型またはp型オーミック電極を、開口部を設けた網状電極、或いは電極を井目状に配置した格子状電極等から構成すると、高強度のLEDを得るのに優位となる。オーミック電極を設けるクラッド層或いはコンタクト層の表面を部分的に被覆する形状の電極とすると、電極材料により、発光が吸収される割合が低減され、逆に、開口部を介して吸収されずに透過して来る発光が増量されるからである。従って、高い発光強度のLEDを得るのに寄与できる。

【0044】

以上述べたように、この発明の実施形態では、多重量子井戸構造の発光層において、その両端をなす層を何れも障壁層としたので、発光層からクラッド層へのキャリアの拡散を抑制することができる。すなわち、井戸層内にキャリアを閉じ込める作用を有するため、発光出力を向上させることができる。

【0045】

また、多重量子井戸構造の発光層の両端をなす障壁層のうち、p型クラッド層に接する他端層を、他の障壁層より層厚を大としたので、n型クラッド層側から注入されるキャリア（電子）のp型クラッド層側への流入を抑制することができ、発光出力を高くすることができる。

【0046】

ところで従来のように、発光層の一端側、他端側に井戸層が存在していると、その井戸層がクラッド層に直接接合するため、この井戸層のみ異なる結晶性、異なるバンドギャップの層に接合することとなり、他の井戸層に比較して結晶性、歪、発光波長が異なってしまうという問題点を有していた。これに対して、この発明の実施形態では、発光層の両端をなす層を何れも障壁層としたので、井戸層が接する層は必ず障壁層となり、井戸層を取り囲む環境が何れの井戸層にとっても同一となるため、各井戸層の発光作用もより一定化し、したがって、発光波長もより安定したばらつきの少ないものとすることができる。上記したように、クラッド層に接する井戸層が存在すると、その井戸層と、より内側に形成され障壁層に挟まれている井戸層とは接する層が異なるものとなるため、それに起因して発光作用が影響を受け、長波長化するなど、発光ピークの半値幅の増大を招いていた。

【0047】

また、この発明の実施形態では、井戸層が接する層は必ず障壁層となり、成長させる層の順番も、障壁層→井戸層→障壁層となるため成長条件がどの井戸層でも略同一となり、したがって、井戸層の形成をより安定して行うことができ、点欠陥の発生を抑制して、品質を良好なものとするることができる。この点からも発光出力を改善することができる。従来のようにクラッド層に接する井戸層が存在すると、その井戸層と、より内側に形成され障壁層に挟まれている井戸層とは接する層が異なり、一方、クラッド層と障壁層とは成長条件が異なるため、特にクラッド層に接する井戸層には点欠陥が発生し、発光出力が低下していた。

【0048】

さらに、本発明によれば、発光効率を1.5倍程度向上させることができ、したがって、LEDランプの発光出力及び電光変換効率ともに1.5倍程度向上させることができ、省エネルギーに寄与することができる。

【実施例】

【0049】

（実施例1） 以下、サファイア基板上に形成した本発明に係る構成からなる多重量子井戸構造の発光層を利用して、III族窒化物半導体発光ダイオードを作製する場合を例にして本発明を具体的に説明する。

【0050】

図1は本実施例1に係るLEDを作製するために用いた積層構造体の断面構造を模式的に示す図、図2は図1の積層構造体の発光層の構成を模式的に示す図、図3は図1の積層構造体から作製したLEDの平面構造を模式的に示す図である。

【0051】

LED10を作製するための積層構造体11を形成するために、まずサファイア基板101を、高周波（RF）誘導加熱用のRFコイルを外周に配置した石英製のMOCVD反応炉内に設置した。窒素ガスを10分間に亘って流通し、反応炉内をバージした後、10分を掛けて基板101の温度を室温から1150℃に昇温した。基板101の温度を1150℃に保ったまま、水素ガスと窒素ガスを流通させながら10分間放置して、基板101の表面をサーマルクリーニングした。

【0052】

サファイア基板101には、第1の工程として、モル比にして1:2で混合したトリメチルアルミニウム (TMA1) の蒸気とトリメチルガリウム (TMGa) の蒸気とを含む気体と、アンモニア (NH₃) とを吹き付ける表面処理を施した。第1の工程での、所謂、V/III比 (NH₃ / (TMA1+TMGa) 濃度比率) は約85に設定した。1150℃で6分間、表面処理を施した後、TMGaとTMA1の蒸気を含む気体の反応炉内への供給を停止した。

【0053】

続いて、第2の工程としてTMGaとアンモニアガスを流通して、(0001)-サファイア基板101上に、アンドープでn型窒化ガリウム (GaN) 層102の形成を1時間掛けて行い、膜厚を0.8μmとした。

【0054】

アンドープでn型のGaN層102上には、Siドーブn型GaN層103を形成した。同層103の形成時には、シランガス (SiH₄) をドーピング源として、電子濃度が $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ となる様に珪素 (Si) をドーピングした。Siドーブn型GaN層103の層厚は2μmとした。

【0055】

次に、Siドーブn型GaN層103上には、TMGaとTMA1、及びNH₃を原料とし、SiH₄をドーピング源として、Siドーブのn型窒化アルミニウム・ガリウム (Al_{0.99}Ga_{0.91}N) 層104を形成した。Al_{0.99}Ga_{0.91}N層のキャリア (正孔) 濃度は、 $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ とし、層厚は8nmとした。

【0056】

その後、アンモニアガスを反応炉内に流通させながら、基板101の温度を1150℃から830℃へ低下させた。次に、トリメチルインジウム (TMIn) をインジウム原料として、Al_{0.99}Ga_{0.91}N層104上に、膜厚を50nmとするSiドーブの窒化ガリウム・インジウム (In_{0.01}Ga_{0.99}N) からなるn型クラッド層105を形成した。

【0057】

n型クラッド層105上には、GaNよりなる障壁層21と、In_{0.04}Ga_{0.96}Nよりなる井戸層22で構成される多重量子井戸構造の発光層2を形成した。この多重量子井戸構造の形成にあたっては、SiドーブIn_{0.01}Ga_{0.99}Nからなるn型クラッド層105上に、始めにSiドーブGaN障壁層21mを形成し、そのSiドーブGaN障壁層21m上にIn_{0.04}Ga_{0.96}N井戸層22を形成した。井戸層22の層厚は、全ての井戸層につき、2nmとした。SiドーブGaN障壁層21及びIn_{0.04}Ga_{0.96}N井戸層22を交互に5回繰り返して積層したのち、表面に在る5番目のIn_{0.04}Ga_{0.96}N井戸層22上に、改めて、SiドーブGaN障壁層21を接合させて設け、多重量子井戸構造の一端層21m及びp型クラッド層107側の他端層21nの両層をSiドーブGaN障壁層21とする構造とした。

【0058】

上記のSiドーブGaN障壁層21は全部で6層であるが、他端層21nを除く5層のSiドーブGaN障壁層21の層厚は15nmとした。一方、他端層21nをなすSiドーブGaN障壁層21の層厚は他の障壁層より厚い20nmとした。

【0059】

多重量子井戸構造の発光層2上には、マグネシウム (Mg) ドープのAl_{0.07}Ga_{0.93}Nからなるp型クラッド層107を1100℃で形成した。p型クラッド層107のキャリア (正孔) 濃度は、 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ とし、層厚は10nmとした。

【0060】

更に、p型クラッド層107上には、MgドーブGaN層をp型コンタクト層108として成長させた。p型コンタクト層108のキャリア (正孔) 濃度は $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ とし、層厚は100nmとした。

【0061】

p型コンタクト層108の成長を終了した後、誘導加熱式ヒータへの通電を停止して、

基板101の温度を室温まで20分を掛けて降温した。成長温度(1100℃)から300℃迄、降温する際には、反応炉内のキャリアガスを窒素とし、併せて容量比率にして1%のNH₃を流通した。その後、基板101の温度が300℃となった時点で、NH₃の流通を停止し、雰囲気ガスを窒素のみとした。基板101の温度が室温まで降温したのを確認して、積層構造体11を反応炉より外部へ取り出した。

【0062】

以上の様な降温、冷却操作に依れば、p型コンタクト層108は、p型不純物としてドーピングしたMgを電気的に活性化するためのアニール処理を行わなくても、p型の伝導性を示した。

【0063】

上記の如く形成した積層構造体11に、一般的な選択バターニング技術を応用して選択エッチングを及ぼし、n型オーミック電極109を形成する予定の領域に限り、SiドープGaN層103の表面を露出させた。露出させたSiドープGaN層103の表面には、その表面に接触する側をニッケル(Ni)とした、Ni/アルミニウム(Al)/チタン(Ti)/金(Au)の4層を順次、重層させたn型オーミック電極109を設けた。また、積層構造体11の表面に残置したp型コンタクト層108上の略全面には、図3に示す如く、金(Au)のみからなる透光性のp型オーミック電極110を形成した。p型オーミック電極110上には、下面側から順にチタン(Ti)、アルミニウム(Al)、及び金(Au)を順次積層した構造のボンディングパッド(台座電極)111を接合させて設けた。

【0064】

その後、サファイア基板101の裏面を、当初の350μmから10.0μm迄、研削し薄板とし、更に、精密に研磨して研削した表面を鏡面状の平坦面に仕上げた。然る後、350μm角の平面視で正方形の個別のLEDチップに切断した。チップ化したLED10を、n型オーミック電極109とp型台座電極111を介して素子駆動電流をLEDチップ10に流通できる様にリードフレームへ接合させた。

【0065】

n型オーミック電極109及びp型オーミック電極110間に順方向に素子駆動電流を流してLEDチップ10を発光させた。順方向電流を電流20mAとした際の発光波長は395nmであった。また、一般的な積分球を利用して測定される発光の出力は、8.7mWと高値となった。一方で、順方向電流を20mAとした際の順方向電圧は3.3Vと低値であった。これより、順方向電圧が低く、且つ高発光出力の近紫外LEDがもたらされることが示された。

【0066】

(比較例) 本比較例では、障壁層の層厚を何れも同一とする多重量子井戸構造の発光層を用いてLEDを構成し、発光特性を比較した。

【0067】

即ち、上記の実施例1に記載した多重量子井戸構造にあって、他端層(図2の符号21n)をも、他の障壁層と層厚を同一とするSiドープGaN障壁層から構成した。多重量子井戸構造の発光層以外は、実施例1に記載の積層構成、及び電極構成と全く同一とした。

【0068】

実施例1と同じ方法でマウントしたLEDチップに、リードフレームを介して20mAの順方向電流を流したところ、波長を395nmとする近紫外帯光が出射された。ところが、発光波長は上記の実施例1のLEDチップ10と同一であるものの、順方向電圧は3.5Vとより高くなった。併せて、発光出力値は5.9mWに低下し、実施例1のLED10の特性に及ぶものとは成り得なかった。

(実施例2)

【0069】

本実施例2では、層厚を互いに異にする障壁層を備えた多重量子井戸構造の発光層を利

用してIII族窒化物LEDを構成する場合を例にして、本発明の内容を具体的に説明する。

【0070】

本実施例2では、上記の実施例1に記載の発光層をなす多重量子井戸構造を形成するにあたり、一端層（図2の符号21m）の障壁層の層厚を15nmとし、2番目の障壁層の層厚を16nmとし、3番目の障壁層の層厚を17nmとし、4番目の障壁層の層厚を18nmとし、5番目の障壁層の層厚を19nmとした。

【0071】

即ち、n型クラッド層（図1、図2の符号105）からp型クラッド層（図1、図2の符号107）に向けて、SiドープGaN障壁層の層厚を、順次厚くして、量子井戸構造を構成した。他端層21nをなすSiドープGaN障壁層の層厚は20nmとした。

【0072】

上記の実施例1と同一の方法で作製したLEDチップに、順方向に20mAの素子駆動電流を通流させて特性を評価した。発光波長は395nmであった。順方向電圧は3.3Vと高くなったものの、発光出力は実施例1と同様に8.9mWと高く、高出力の近紫外LEDがもたらされ、比較例に記載の従来のLEDに比べれば、順方向電圧、及び発光出力に優れるLEDとなった。

【0073】

（実施例3） 他端層に、不純物濃度に分布を付した障壁層を用いた多重量子井戸構造の発光層を利用してIII族窒化物半導体層を構成する場合を例にして、本発明を具体的に説明する。

【0074】

本実施例3では、上記の実施例1に記載の多重量子井戸構造をなす他端層21nを、Si不純物の濃度を、井戸層と接合する領域側で低くし、層の中央部でより高くし、中央部より層厚の増加方向（p型クラッド層107の方向）に向けて漸次減少させたSiドープGaN層から構成した。

【0075】

他端層では、井戸層との接合界面から、層厚の増加方向に5nmに至る内部領域において、Si不純物の濃度は $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ とした。井戸層との接合界面から層厚方向に5nmを超え、10nmに至る障壁層の中央の領域でのSi不純物の濃度は、 $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ とした。また、中央の領域からp型クラッド層との接合界面に向けた領域では、Si不純物の濃度を $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ から、 $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ へ直線的に減少させた。各領域のSi不純物濃度は、他端層をなす障壁層の成長時に、反応系へ供給するSiH₄ガスの流量を経時的に変化させて調整した。

【0076】

実施例1と同じ方法でLEDチップを作製し、チップに順方向電流を流したところ、順方向電流を20mAとした際の発光波長は395nmであった。また、順方向電圧は3.2Vと低く、発光の出力は8.6mWであり、比較例に記載の従来のLEDに比べれば、順方向電圧、及び発光出力に優れるLEDとなった。

【図面の簡単な説明】

【0077】

【図1】本実施例1に係るLEDを作製するために用いた積層構造体の断面構造を模式的に示す図である。

【図2】図1の積層構造体の発光層の構成を模式的に示す図である。

【図3】図1の積層構造体から作製したLEDの平面構造を模式的に示す図である。

【符号の説明】

【0078】

- 2 発光層
- 10 LED
- 11 積層構造体

- 21 障壁層
- 21m 一端層 (障壁層)
- 21n 他端層 (障壁層)
- 22 井戸層
- 101 結晶基板
- 102 アンドープn型GaN層
- 103 Siドープn型GaN層
- 104 Siドープn型窒化アルミニウム・ガリウム ($Al_{0.09}Ga_{0.91}N$) 層
- 105 n型クラッド層
- 106 発光層
- 107 p型クラッド層
- 108 p型コンタクト層
- 109 n型オーミック電極
- 110 p型オーミック電極
- 111 ボンディングパッド (台座電極)